

# Displays Smart, Android e Linux Embarcado:

## CrITÉrios Técnicos para Seleção de Plataforma em Aplicações Industriais

Baseado em experiência de campo e dados publicados.

Agradecimentos às contribuições técnicas da **Toradex** (plataforma Torizon OS, conformidade CRA, OTA) e **B2Open** (Linux Embarcado)

Referências: IEC 62443, CRA (UE) 2024/2847, Yocto Project, PREEMPT\_RT, Linux Foundation Embedded 2024, NXP, Toradex, Advantech

### 1. Introdução

A proliferação de interfaces gráficas em equipamentos industriais, máquinas agrícolas e IoT embarcado estruturou um mercado de displays TFT industriais em três arquiteturas principais: controladores MCU dedicados sem sistema operacional de propósito geral, plataformas Smart com SoCs proprietários e firmware fechado, e módulos executando Android ou Linux embarcado sobre sistema operacional completo.

Cada arquitetura apresenta vantagens objetivas em contextos específicos. A escolha equivocada ocorre não por ignorância da tecnologia, mas pela aplicação de critérios de prototipagem em produtos de ciclo longo. Este artigo qualifica os critérios de seleção com base em dados medidos, experiência de campo documentada e referências normativas — sem posicionar nenhuma arquitetura como universalmente superior.

A HTMG atua no fornecimento de displays industriais nas três arquiteturas. A análise que segue reflete essa experiência de forma equilibrada.

### 2. Arquiteturas de Display Industrial

(\*) Varia significativamente por fabricante — ver análise na Seção 3.3. (\*\*) Limitado pelo ciclo de suporte oficial do Android OS — ver Seção 4.1.

| Arquitetura                         | Descrição   | Plataformas Típicas   | Uso Adequado  | Ciclo Típico |
|-------------------------------------|---|---|---|--------------|
| <b>MCU / Display Simples</b>        | MCU dedicado. Sem SO. Firmware próprio (LVGL, emWin).                 | STM32, RA, PIC32  | IHMs simples, indicadores                               | 3–15 anos    |
| <b>Display Smart / Proprietário</b> | SoC com firmware fechado. Interface UART/RS232/RS485.                 | Nextion, STONE, DWIN (DGUS), TDO (Giraffe IDE)                        | Protótipo, retrofit, HMI de baixo custo                 | 2–7 anos*    |
| <b>Display com Android</b>          | SoC executando Android AOSP. GUI nativa Java/Kotlin.                  | Rockchip RK3568, Allwinner A40i, Qualcomm                             | Quiosques, painéis médios, ciclo curto                  | 3–5 anos**   |
| <b>Display com Linux Embarcado</b>  | Kernel Linux customizado (Yocto/Buildroot). Acesso total ao hardware. | i.MX8 (NXP), RK3568, AM62x / AM62D / AM62P e AM64x (TI), Toradex SoMs | Automação industrial, agtech, ciclo longo, certificação | 10–15 anos   |

### 3. Displays Smart — Análise Técnica

Displays Smart — Nextion, STONE TFT, DWIN (série DGUS/T5L) e TDO (Giraffe IDE) — combinam display, controlador e firmware de GUI em um único módulo com interface UART. A proposta é reduzir a carga de desenvolvimento no MCU host. Essa arquitetura tem vantagens objetivas em contextos específicos e limitações estruturais em produtos de ciclo longo.

#### ✔ Vantagem técnica — RS232 e RS485 nativos

Displays Smart suportam nativamente RS232 e RS485 — protocolos dominantes no parque industrial instalado no Brasil (CLPs, inversores, medidores). Em projetos de retrofit com infraestrutura de campo consolidada, essa integração é direta e sem overhead de hardware adicional. Vantagem objetiva frente a módulos embarcados genéricos.

#### 3.1 Aprisionamento Tecnológico (Vendor Lock-in)

A lógica de interface reside em binário compilado para o SoC proprietário de cada fabricante: .tft (Nextion), .hmi (STONE), .dgus (DWIN) e .grf/Giraffe IDE (TDO). Os arquivos não são interoperáveis entre plataformas.

- **Migração entre fabricantes:** tipicamente requer reescrita integral da interface gráfica — não existe padrão portátil entre plataformas Smart.
- **Ferramentas proprietárias:** Nextion Editor, STONE Designer, DWIN DGUS Tool e TDO Giraffe Tool — sem API pública e sem integração com Git ou CI/CD. Nota: modelos DWIN T5L2 permitem desenvolvimento secundário via KEIL C51, compilador externo pago para arquitetura 8051, em fluxo separado do DGUS.
- **Protocolos industriais nativos:** OPC-UA, MQTT e Modbus TCP introduzem a necessidade de intermediação via MCU host — o display não executa pilha de protocolo diretamente.

#### ⚠ Risco Observado — Nextion, 2019

A ITEAD atualizou o firmware Nextion alterando o protocolo serial sem notificação de retrocompatibilidade. Equipamentos em campo com firmware anterior deixaram de comunicar com displays de reposição do mesmo fabricante. Risco estrutural inerência a protocolos fechados sem compromisso formal de retrocompatibilidade.

#### 3.2 Capacidade Computacional, Confiabilidade e Campo

O display executa renderização e lógica condicional simples. Processamento de processo, logging e análise de dados residem no MCU host. Em campo:

- **Corrupção de flash:** interrupções na atualização de firmware por falha de energia resultam em módulos inutilizáveis sem jig de recuperação. Mitigação: proteção de energia (UPS ou supercapacitor) durante a gravação.

#### 🏠 Experiência de Campo

Comportamento documentado em fóruns técnicos especializados (EEVblog, Reddit r/embedded, Stack Overflow EE). Sem publicação técnica formal consolidada nesse segmento específico. Reflete experiência acumulada de campo — não dado de laboratório controlado.

- **Watchdog não configurável:** o firmware fechado não expõe parâmetros de watchdog. Recuperação de travamentos requer intervenção física.

- **Diagnóstico remoto:** a ausência de logs de sistema torna a investigação de causa raiz dependente de acesso físico ao equipamento.
- **Temperatura operacional:** varia significativamente entre linhas e versões. Linha básica Nextion: 0°C a 60°C. Linhas industriais DWIN T5L, STONE e TDO: variantes certificadas para -20°C a +70°C. Verificação obrigatória por SKU — não por marca.

### 3.3 Ciclo de Vida — Análise por Fabricante

| Fabricante               | Histórico   | Gestão de EOL  | Disponibilidade   |
|--------------------------|---|--|---|
| <b>Nextion (ITEAD)</b>   | 2014. Origem maker. Em 2025 lançou Open Nextion (Genius Séries) com GPIO e wireless — não substitui a linha clássica.   | Sem política formal. LTA declara disponibilidade mínima de 5 anos por série.   | Modelos revisados sem aviso. Protocolo alterado em 2019. Open Nextion usa protocolo diferente — risco de fragmentação de ecossistema. |
| <b>STONE Technology</b>  | 2013. Foco industrial.  | Notificação informal   | Linha mais estável que Nextion. Alguns modelos ativos 5+ anos.  |
| <b>DWIN Technology</b>   | 1999. Clientes industriais consolidados.  | Notificação com antecedência. Série T5 ativa há mais de 10 anos.   | T5L/DGUS estável. T5L2: desenvolvimento C via KEIL C51 (externo, pago). T5L0/T5L padrão: DGUS II apenas.                              |
| <b>TDO (Giraffe IDE)</b> | Foco em HMI industrial. A linha Giraffe IDE é evolução da linha TGUS — trajetória que amplia a avaliação de longevidade da empresa além do lançamento do produto atual. | Não padronizada publicamente. Histórico de continuidade entre linhas (TGUS → Giraffe) sugere compromisso com transição gerenciada. | Linha estável. Compatibilidade mantida dentro da família Giraffe.   |

#### Plataforma Smart da HTMG — TDO Giraffe IDE

Para projetos que requerem plataforma Smart com ciclo de vida industrial, a HTMG distribui o TDO Giraffe IDE — com inserção de código C diretamente no IDE (sem toolchain externo), customização de produto e suporte técnico local em português. Para projetos com ciclo de vida acima de 5 anos, exija do distribuidor: (1) declaração formal de disponibilidade mínima por modelo, (2) buffer stock agreement, e (3) confirmação de fase de ciclo do produto. A HTMG pode apoiar essa avaliação.

## 4. Displays Android — Análise Técnica

O Android apresenta atratividade real: ecossistema maduro, suporte a Java e Kotlin, extensa biblioteca de UI e ampla disponibilidade de desenvolvedores. Para aplicações de baixa criticidade, ciclo curto e sem requisito de I/O de processo, pode ser adequado. Para produtos industriais de ciclo longo, as limitações são de natureza arquitetural.

### ✓ Quando Android é a escolha certa

Android é uma plataforma madura e produtiva para uma ampla classe de aplicações industriais e empresariais. Os casos a seguir representam contextos em que Android é tecnicamente adequado e comercialmente competitivo:

- **Telemetria e dashboards operacionais** — painéis de visualização de dados conectados à nuvem, onde a riqueza de UI e a disponibilidade de bibliotecas gráficas são diferenciais reais.
- **Aplicativos de manutenção e inspeção** — apps utilizados por técnicos em campo, integrados a sistemas MES/ERP via API REST, onde o ecossistema Android/Java acelera o desenvolvimento.
- **Interfaces cloud-native e edge AI leve** — sistemas que consomem modelos de inferência via API ou executam modelos TFLite localmente, onde o SDK Android oferece integração direta com frameworks de ML.
- **Equipamentos de ciclo curto (2–4 anos)** — produtos com ciclo de vida compatível com o suporte de SO do Android, sem requisito de I/O de processo direto.
- **Apps empresariais em tablets Ruggedized** — operação remota, inventário, rastreabilidade e supervisão portátil, onde a portabilidade e o ecossistema de apps são requisitos primários.

*As seções a seguir qualificam os desafios do Android especificamente para produtos industriais embarcados de ciclo longo — não para todos os contextos de uso. Se o seu projeto se enquadra nos casos acima, Android pode ser a escolha mais produtiva.*

### 🔗 Contexto de Mercado — Tendência Observada em 2025

Análises de mercado publicadas em 2025 registram avanço de Android SBCs sobre Linux em painéis de controle industrial, motivado por três fatores: (1) desenvolvedores Android são mais rápidos na construção de UI ricas; (2) clientes industriais passaram a exigir interfaces com qualidade próxima de smartphone; (3) bundles chineses de painel + CPU com Android reduziram o custo em 30–40% em relação a 5 anos atrás. Este artigo reconhece essa tendência como real — e qualifica os riscos que ela não endereça: ciclo de suporte de SO, determinismo de I/O e conformidade regulatória.

### 4.1 Obsolescência de SO e Conformidade Regulatória

- **Suporte oficial limitado:** o Google oferece patches de segurança por no máximo 3 anos por versão. Displays com Android 9 (2018) estão sem patches desde novembro de 2021.
- **Fragmentação de BSP:** fabricantes de módulos embarcados (Rockchip, Allwinner) entregam BSPs 2 a 4 versões atrás do Android mainline, tornando atualizações de segurança independentes tipicamente complexas ou impraticáveis na maioria dos cenários.
- **Segmento médico — risco amplificado:** equipamentos médicos com interface Android estão sujeitos à FDA 21 CFR Part 11 (EUA) e à ANVISA RDC 751/2022 (Brasil), que exigem trilha de auditoria imutável e controle de versão de software validado. Um display Android com versão de SO fora do ciclo de suporte pode comprometer a manutenção do registro sanitário, exigindo reprocesso de validação ou compensações arquiteturais específicas.

**⚠ Risco Regulatório — CRA (UE) 2024/2847**

O Cyber Resilience Act exige atualizações de segurança durante todo o ciclo de vida declarado do produto. Displays Android sem suporte ativo de patches introduzem risco de conformidade para produtos destinados ao mercado europeu.

## 4.2 Performance de Inicialização — Dados Medidos

**📊 Referência de Campo**

Fonte: medições de campo documentadas em plataformas Rockchip RK3568 e i.MX8M Plus com Yocto. Valores representam faixa típica — configurações específicas podem variar. Metodologia: tempo entre energização e primeira resposta de UI ao toque.

| Plataforma                             | Boot → UI (s) | Boot → I/O (s) | RAM idle   | Impacto operacional  |
|--|---------------|----------------|------------|--|
| Android 11 — RK3568 (otimizado)        | 18–35         | 12–20          | 600–900 MB | Requer mitigação para aplicações com requisito de boot < 5 s                       |
| Android AOSP mínimo (sem GMS)          | 12–22         | 8–15           | 350–500 MB | Requer mitigação — considerar splash screen e boot antecipado de serviços críticos |
| Linux Embarcado — Yocto mínimo (i.MX8) | 3–8           | 2–5            | 50–180 MB  | Adequado para aplicações com requisito de boot < 5 s                               |

## 4.3 Determinismo de I/O e Jitter

**📊 Referência de Campo — Latência de interrupção**

Linux com PREEMPT\_RT (kernel 6.6 LTS, i.MX8M Plus, Toradex Verdin): jitter máximo de 50–150  $\mu$ s em condições de carga típica industrial (fonte: PREEMPT\_RT wiki, medições Toradex 2023).

Android 11 (AOSP, RK3568): jitter observado de 50–500 ms em cenários com GC ativo, em medições de campo com BSP padrão do fabricante — valores podem variar conforme configuração de kernel e carga do sistema (fonte: relatórios de campo Android Automotive, SOAFEE 2022).

Impacto: para controle de processo com requisito < 1 ms jitter, Android introduz risco de falha de requisito estrutural.

O Android AOSP padrão não incorpora o patch PREEMPT\_RT na maioria dos BSPs comerciais disponíveis. O scheduler AOSP, em sua configuração típica, não opera com preempção determinística. Processos de sistema — GC da JVM, Doze Mode, App Standby — podem suspender tarefas de aplicação em momentos não determinísticos.

## 4.4 Segurança e Superfície de Ataque

- **CVEs acumulados:** o NVD registra mais de 2.800 CVEs atribuídos ao Android desde 2014. Versões fora do ciclo de suporte acumulam vulnerabilidades sem patches.

- **ADB exposto:** módulos Android tipicamente mantêm o Android Debug Bridge ativo em USB OTG por padrão em configurações de fábrica — vetor de acesso não autenticado em ambientes industriais quando não desabilitado explicitamente.
- **Modelo de permissões OT:** o sandbox do Android foi projetado para isolamento entre aplicativos de usuário — não para o modelo Purdue e IEC 62443, exigindo controles compensatórios para conformidade em ambientes OT.

#### Hipótese Arquitetural

A remoção completa de dependências de rede residuais do Android (mesmo em AOSP sem GMS) é tecnicamente possível, mas não trivial — requer auditoria de código de framework e tende a regredir a cada atualização de BSP. Em projetos com requisito IEC 62443, essa abordagem introduz custo de engenharia contínuo não previsto na estimativa inicial.

## 4.5 Tablets Ruggedized — Categoria Distinta

Tablets Ruggedized (Getac, Panasonic Toughbook, Zebra, Samsung Galaxy Tab Active) são uma categoria tecnicamente distinta dos módulos Android embarcados. Com MIL-STD-810H verificado, IP67 e suporte de SO estruturado por 5 a 10 anos (Zebra Lifeguard, Samsung Knox), resolvem os problemas de durabilidade física e ciclo de SO do Android genérico.

No mercado brasileiro, o parque de tablets industriais é majoritariamente composto por fabricantes chineses (Urovo, iData, Chainway, 3R Tablets, Newaye). Nota: 3R Tablets e Newaye compartilham a mesma origem — Neway (HK) Holdings Limited — com portal em português (pt.newaye.com) para exportação. Não constituem operações brasileiras independentes. Nenhum desses dispositivos oferece suporte de SO estruturado equivalente ao Zebra Lifeguard.

| Característica                              | Módulo Android Embarcado      | Tablet Ruggedized Chinês (Urovo, iData, 3R, Newaye...) | Tablet Ruggedized Ocidental (Zebra, Getac)          |
|---|-------------------------------|--|---|
| <b>Certificação mecânica</b>                | Nenhuma                       | IP65/IP67 declarado — qualificação variável por modelo | MIL-STD-810H certificado e auditável                |
| <b>Patches de segurança</b>                 | Irregular / BSP do módulo     | Irregular — sem programa formal                        | Ciclo formal (Zebra: 10 anos, Samsung Knox: 5 anos) |
| <b>Acesso a GPIO / I<sup>2</sup>C / CAN</b> | Disponível (módulo integrado) | Via adaptadores dedicados em modelos específicos       | Via adaptadores dedicados em modelos específicos    |
| <b>Montagem em painel / máquina</b>         | SIM — integrado ao produto    | NÃO — periférico externo                               | NÃO — periférico externo                            |
| <b>Custo no mercado BR</b>                  | Baixo–Médio                   | Médio  | Alto — disponibilidade limitada no Brasil           |

## 5. Linux Embarcado — Vantagens Estruturais

Linux embarcado — sobre Yocto Project, Buildroot ou distribuições mínimas customizadas — é adotado por referências da indústria em automação industrial, equipamentos médicos e agtech: Bosch Rexroth (ctrlX AUTOMATION), Beckhoff (TwinCAT com Linux RT), Siemens (Simatic IPC industrial), Advantech (série industrial Linux), John Deere (sistemas de precisão agrícola) e NXP/Toradex como plataformas de hardware e software de referência. Essa adoção reflete vantagens técnicas e operacionais objetivas.

### 5.1 Ciclo de Vida e Independência de Fornecedor

- **Kernels LTS:** kernel 5.15 LTS: suporte até 2027; kernel 6.6 LTS: suporte até 2029 (fonte: kernel.org).
- **Yocto Project LTS:** Kirkstone LTS: 2022–2026; Scarthgap LTS: 2024–2028 (fonte: yoctoproject.org).
- **Independência de fornecedor:** atualizações de segurança não dependem da existência comercial do fabricante do módulo. Portabilidade de hardware via Device Tree — migração de SoC exige adaptação do DTS, não reescrita da aplicação.
- **Civil Infrastructure Platform (CIP):** projeto da Linux Foundation fundado em 2016 por Siemens, Toshiba e Hitachi, o CIP mantém kernels LTS específicos com suporte estendido de 10 a 20 anos para produtos de infraestrutura civil e automação industrial — cobrindo os ciclos de vida de 12 a 20 anos típicos de tratores, equipamentos de transporte e sistemas de controle industrial. Referência: cip-project.org

### 5.2 Controle de Pilha e Segurança Auditável

- **Kernel configurável:** imagem típica usa 15–30% dos módulos de um kernel genérico. Redução de superfície de ataque e tempo de boot mensuráveis.
- **PREEMPT\_RT:** patch de kernel que transforma Linux em RTOS de soft real-time — latências de interrupção na faixa de microssegundos. Opção de compilação direta, sem dependência de fornecedor.
- **Auditabilidade completa:** código-fonte integralmente auditável para todos os componentes da pilha open source. Viabiliza auditorias SAST, DAST e penetration testing sobre o sistema completo — requisito para IEC 62443, CE Machinery Directive e FDA 21 CFR Part 11.
- **OTA seguro:** frameworks open source como **Mender**, **RAUC** e **SWUpdate** implementam atualizações com verificação de assinatura criptográfica e rollback automático — utilizados por Bosch Rexroth e Advantech em produtos industriais em produção. A Toradex implementa OTA via Aktualizr, cliente proprietário integrado à plataforma Torizon OS.

#### 🔒 Torizon OS — Conformidade com CRA (UE) 2024/2847

A Toradex documentou conformidade estruturada com o Cyber Resilience Act na plataforma Torizon OS: geração automática de SBOM (Software Bill of Materials), Vulnerability Manager integrado para monitoramento contínuo de CVEs, e atualizações remotas de segurança via Aktualizr. Referência: [torizon.io/eu-cyber-resilience-act-cra](https://torizon.io/eu-cyber-resilience-act-cra)

### 5.3 Conectividade Industrial Nativa

- **Protocolos nativos em C:** OPC-UA (open62541), MQTT (Mosquitto), Modbus TCP (libmodbus), CANopen (SocketCAN) — sem overhead de JVM ou framework intermediário.
- **GPIO, SPI, I<sup>2</sup>C, CAN, UART:** acessíveis via sysfs, libgpiod ou drivers de kernel. Agendamento com SCHED\_FIFO ou SCHED\_RR para latências determinísticas.
- **Containers:** Docker e Podman sobre Linux embarcado viabilizam deploy e atualização independente de componentes — padrão em soluções Bosch Rexroth ctrlX e Siemens IloT. Na plataforma Torizon OS (Toradex), containers Docker são o modelo de deployment

padrão: toda aplicação — incluindo a interface gráfica — é executada como container, viabilizando atualização independente de cada componente via OTA sem reinstalação do sistema operacional.

## 6. Arquiteturas Híbridas — Linux RT + Android HMI

Uma abordagem crescente na indústria — e frequentemente omitida em análises binárias entre plataformas — é a arquitetura híbrida: Linux embarcado com PREEMPT\_RT gerenciando o controle de processo em tempo real, com Android operando exclusivamente como frontend de interface gráfica em partição isolada.

### 6.1 Casos de Uso Documentados

- **Automotivo (AUTOSAR + Android):** sistemas como QNX Hypervisor ou seL4 isolam o domínio de segurança (AUTOSAR) do domínio de infotainment (Android). Padrão adotado por montadoras para IHMs de veículos onde requisitos ASIL-B/C coexistem com UI Android.
- **NXP i.MX 8M Plus — Dual-OS:** o SoC suporta execução simultânea de Linux RT e Android via hypervisor Jailhouse ou Xen. Documentado no NXP Application Note AN13624.
- **Toradex — Torizon OS (Linux) ou Android como SOs alternativos:** os módulos Toradex (Verdin, Colibri, Apalis) suportam Torizon OS (Linux embarcado) ou Android como sistema operacional — não em execução simultânea. Android nos módulos Toradex é provido via BSPs de parceiros certificados (Sibrain, Silicon Signals). A arquitetura híbrida Linux RT + Android HMI em hardware Toradex requer solução de hypervisor independente, como Jailhouse sobre i.MX8M Plus (NXP AN13624).
- **Beckhoff TwinCAT + HMI:** TwinCAT 3 opera como RTOS sobre Windows ou Linux — o ambiente de controle determinístico coexiste com frontend de visualização não determinístico.
- **Bosch Rexroth ctrlX AUTOMATION:** arquitetura baseada em Linux RT com apps containerizados. Permite deploy de interface Android como container isolado sem impactar o core de controle.

### 6.2 Critérios de Adoção e Limitações

#### Hipótese Arquitetural

Arquiteturas híbridas resolvem a tensão entre UI rica (Android) e controle determinístico (Linux RT), mas introduzem complexidade de integração significativa: configuração de hypervisor, particionamento de recursos e custo de certificação mais elevado. Recomendadas para projetos com equipe de engenharia de sistemas experiente e ciclo de desenvolvimento > 12 meses.

Para a maioria dos projetos industriais brasileiros — escala de centenas a poucos milhares de unidades, equipe de firmware reduzida e prazo de 6 a 12 meses — a arquitetura híbrida representa complexidade desproporcional ao contexto. Linux embarcado com Qt ou LVGL como framework de UI cobre a maioria dos casos sem a necessidade de particionamento de hypervisor.

## 7. Benchmark Comparativo

### Faixas de Referência — Metodologia

Valores baseados em: (1) medições publicadas por NXP, Toradex e Advantech em plataformas de referência; (2) Linux Foundation Embedded Linux Landscape Report 2024; (3) PREEMPT\_RT wiki e kernel.org; (4) documentação Yocto Project e Rockchip BSP. Exceção: CPU load (baseline) é apresentado como estimativa típica de faixa — não como medição controlada. Todos os valores representam faixas observadas típicas em condições representativas de campo — não resultados de ensaio laboratorial controlado, nem especificações garantidas de produto. Implementações específicas podem apresentar valores fora dessas faixas.

## 8. Comparativo Técnico Consolidado

| Critério                                     | Display Smart                       | Display Android                         | Linux Embarcado  |
|--|-------------------------------------|---|--|
| Ciclo de vida de SO garantido                | 2–7 anos (por fabricante)           | 3–5 anos (OS support)                   | 10–15 anos (LTS kernel)  |
| Boot time até UI operacional                 | 5–15 s (firmware)                   | 18–35 s                                 | 2–8 s  |
| Acesso a GPIO / I <sup>2</sup> C / SPI / CAN | Via host MCU apenas                 | NDK / HAL — sem garantia de latência    | Nativo, determinístico   |
| Jitter de I/O                                | N/A (sem SO)                        | 50–500 ms (em configurações típicas)    | 50–150 µs (faixa típica observada, PREEMPT_RT)                         |
| Suporte PREEMPT_RT                           | Não aplicável                       | Não suportado em BSPs comerciais padrão | Opção de compilação padrão   |
| Auditabilidade de segurança                  | Não — firmware binário fechado      | Parcial — AOSP parcialmente open        | Total — 100% open source   |
| Patches de segurança 10 anos                 | Não garantido                       | Não garantido (máx. 3 anos)             | Sim — kernels LTS  |
| Portabilidade de aplicação                   | Nula — plataforma fechada           | Limitada — versões Android              | Alta — POSIX, C/C++, Qt, LVGL  |
| Conformidade IEC 62443                       | Certificação requer escopo limitado | Requer mitigação significativa          | Viável — SELinux/AppArmor  |
| OTA com rollback garantido                   | Não disponível na maioria           | Parcial — sem rollback nativo           | Mender / RAUC / SWUpdate (open source); Aktualizr/Torizon OS (Toradex) |
| Integração OPC-UA / MQTT nativo              | Via host MCU                        | Via APK adicional                       | Bibliotecas C nativas  |
| Diagnóstico remoto                           | Não disponível                      | Limitado — logcat                       | journald, syslog, ELK, Loki  |

## 9. Critérios Práticos de Seleção de Plataforma

| Característica do Projeto                | Smart                               | Android                            | Linux Embarcado                              | Híbrido                                      |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| Protótipo / PoC rápido (< 3 meses)       | Adequado                            | Adequado                           | Investimento maior                           | Depende do requisito                         |
| Retrofit em ambiente RS485/RS232         | Ponto forte                         | Complexo                           | Possível                                     | Não indicado                                 |
| Produção industrial (> 500 unidades)     | Risco médio–alto                    | Risco médio                        | Adequado                                     | Para UI rica                                 |
| Ciclo de vida do produto > 7 anos        | Risco — verificar EOL               | Não ideal para aplicações críticas | Adequado                                     | Adequado                                     |
| Exportação UE (CE, CRA 2024)             | Certificação requer escopo limitado | Requer mitigação                   | Viável                                       | Viável                                       |
| Integração GPIO / CAN / I <sup>2</sup> C | Via host MCU                        | Requer mitigação                   | Nativo                                       | Nativo (core RT)                             |
| Boot < 5 segundos                        | Depende do firmware                 | Requer mitigação                   | SIM  | SIM (core RT)                                |
| Soft real-time (< 1 ms jitter)           | Não aplicável                       | Não ideal para aplicações críticas | PREEMPT_RT                                   | Core RT isolado                              |
| UI rica (Android/Java ecosystem)         | Não aplicável                       | Vantagem                           | Qt / LVGL                                    | Android isolado                              |
| Budget de hardware restrito              | Ponto forte                         | Adequado                           | Custo superior                               | Custo mais alto                              |
| OTA com rollback garantido               | Não disponível                      | Parcial                            | Mender/RAUC/SWUpdate; Aktualizr (Torizon OS) | Mender/RAUC/SWUpdate; Aktualizr (Torizon OS) |
| Segurança auditável (IEC 62443)          | Auditoria limitada                  | Requer mitigação                   | SIM  | Core auditável                               |

Nota para engenheiros e gestores de produto: a adoção de Android frequentemente é motivada por custo inicial de hardware e disponibilidade de desenvolvedores com perfil Android/Java. O custo real da decisão emerge no prazo de 3 a 5 anos, quando o suporte de SO encerra, APIs são depreciadas e a obtenção de certificações regulatórias se torna progressivamente mais complexa e custosa.

## 10. Aplicações por Segmento

A HTMG fornece displays TFT industriais nas três arquiteturas analisadas neste artigo. Os segmentos a seguir ilustram como os critérios de seleção se manifestam em condições reais de campo.

### 10.1 Automação Agrícola e Maquinário de Precisão

Fabricantes como John Deere utilizam Linux embarcado em sistemas de precisão agrícola por requisitos de ciclo de vida, determinismo e integração com sensores de processo. O ambiente de operação impõe qualificações que determinam a plataforma:

- Faixa térmica:  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  — verificação obrigatória por SKU, não por marca
- Vibração ISO 16750-3 (off-road) — conectores de borda e fixações inadequadas são causa documentada de falha precoce
- EMI severo (alternadores, inversores) — proteção CISPR 25 / ISO 11452 requerida
- Boot  $< 3$  s após energização — requisito operacional do operador
- Ciclo de vida: 12–20 anos para tratores e pulverizadores

## 10.2 IoT Industrial e SCADA

Referências como Bosch Rexroth (ctrlX) e Advantech (série industrial Linux) documentam Linux embarcado como padrão para painéis de supervisão industrial. Os requisitos incluem OPC-UA e MQTT nativos, Modbus TCP com latências determinísticas, historian local (SQLite, InfluxDB embarcado) e segmentação de rede (WireGuard, VLAN tagging).

## 10.3 Equipamentos com Requisitos Regulatórios

Para equipamentos destinados à exportação (UE, EUA, Japão) ou setores regulados:

- **CE Marking (Diretiva de Máquinas 2006/42/CE):** análise de risco de software documentada e auditável — processo significativamente mais complexo com firmware binário fechado.
- **FDA 21 CFR Part 11:** exige trilha de auditoria imutável e validação IQ/OQ/PQ — requisitos mais viáveis com SO auditável; com Android, exige estratégia de mitigação específica de auditabilidade.
- **CRA (UE 2024/2847):** atualizações de segurança durante todo o ciclo de vida declarado — Android sem suporte ativo de patches introduz desafios significativos de conformidade, dependendo da implementação do fornecedor e das estratégias de mitigação adotadas.

## 10.4 Equipamentos Médicos e Laboratoriais

O segmento médico é um dos mais exigentes para seleção de plataforma de display — e um dos mais relevantes no mercado brasileiro, onde fabricantes nacionais de equipamentos de diagnóstico, monitoração de pacientes e automação laboratorial adotam Linux embarcado como padrão arquitetural para atender requisitos regulatórios de longo prazo.

Os requisitos determinantes incluem:

- **FDA 21 CFR Part 11:** trilha de auditoria imutável, controle de versão de software e validação IQ/OQ/PQ — mais viável com SO auditável e rootfs verificável; com Android, exige controles arquiteturais adicionais para atender os requisitos de auditabilidade.
- **ANVISA RDC 751/2022:** registro de software como dispositivo médico exige rastreabilidade de versão e histórico de atualizações — introduz desafios significativos com Android sem suporte ativo de patches.
- **IEC 62304:** ciclo de vida de software para dispositivos médicos requer documentação de cada componente da pilha — viabilizado por SBOM gerado pelo Yocto Project ou pela plataforma Torizon OS, não ideal para aplicações críticas com firmware binário fechado.
- **Disponibilidade imediata:** monitores de paciente e equipamentos de UTI não aceitam latências de boot de 20–30 segundos — requisito que, na maioria das implementações Android embarcadas, não é atendido sem mitigações significativas de arquitetura.

## 11. Conclusão

A escolha da arquitetura de display para um produto industrial é uma decisão de engenharia com impacto direto no custo total de propriedade, na capacidade de certificação e na sustentabilidade ao longo do ciclo de vida. Cada arquitetura analisada apresenta vantagens objetivas em contextos específicos.

Displays Smart são adequados para prototipagem, retrofit em ambientes RS485 e projetos com orçamento restrito e ciclo curto — com seleção criteriosa de fabricante e gestão formal de EOL. Android embarcado é adequado para interfaces ricas de ciclo médio sem requisito de I/O de processo — desde que o ciclo de suporte de SO seja compatível com o ciclo do produto. Linux embarcado é a arquitetura predominante em produtos industriais de ciclo longo, com requisitos regulatórios e acesso determinístico a I/O de processo — incluindo equipamentos médicos e laboratoriais sujeitos a FDA 21 CFR Part 11 e ANVISA RDC 751/2022. Arquiteturas híbridas (Linux RT + Android HMI) resolvem casos onde UI rica e controle determinístico são simultaneamente necessários — com custo de engenharia maior.

A avaliação deve ser baseada nos parâmetros concretos do projeto — ciclo de vida, ambiente de operação, requisitos regulatórios e capacidade da equipe — não em preferência de tecnologia ou custo unitário de componente.

Projetos em fase de design-in ou com cadeia de display em revisão podem solicitar à HTMG uma **avaliação de plataforma sem custo**: análise do perfil do projeto — ciclo de vida, ambiente de operação, requisitos regulatórios e escala — com recomendação de arquitetura e indicação de módulos disponíveis em estoque no Brasil. [displays@htmg.com.br](mailto:displays@htmg.com.br) | +55 (19) 3869-7017

## Tabela de Acrônimos

| Acrônimo | Definição                                    |
|----------|--|
| ADB      | Android Debug Bridge                         |
| ANVISA   | Agência Nacional de Vigilância Sanitária     |
| AOSP     | Android Open Source Project                  |
| API      | Application Programming Interface            |
| ASIL     | Automotive Safety Integrity Level            |
| AUTOSAR  | AUTomotive Open System ARchitecture          |
| BLE      | Bluetooth Low Energy                         |
| BSP      | Board Support Package                        |
| CAN      | Controller Area Network                      |
| CI/CD    | Continuous Integration / Continuous Delivery |
| CIP      | Civil Infrastructure Platform                |
| CLP      | Controlador Lógico Programável (PLC)         |
| CRA      | Cyber Resilience Act (UE)                    |

|                  |   |
|------------------|---|
| CVE              | Common Vulnerabilities and Exposures              |
| DAST             | Dynamic Application Security Testing              |
| DRM/KMS          | Direct Rendering Manager / Kernel Mode Setting    |
| DTS              | Device Tree Source                                |
| EMI              | Electromagnetic Interference                      |
| EOL              | End of Life                                       |
| FDA              | Food and Drug Administration (EUA)                |
| GDPR             | General Data Protection Regulation (UE)           |
| GMS              | Google Mobile Services                            |
| GPIO             | General Purpose Input/Output                      |
| GC               | Garbage Collector (JVM)                           |
| GUI              | Graphical User Interface                          |
| HAL              | Hardware Abstraction Layer                        |
| HMI / IHM        | Human-Machine Interface / Interface Homem-Máquina |
| I <sup>2</sup> C | Inter-Integrated Circuit                          |
| IEC              | International Electrotechnical Commission         |
| IMA              | Integrity Measurement Architecture                |
| IoT              | Internet of Things                                |
| JVM              | Java Virtual Machine                              |
| LGPD             | Lei Geral de Proteção de Dados (Brasil)           |
| LTS              | Long-Term Support                                 |
| MCU              | Microcontroller Unit                              |
| MQTT             | Message Queuing Telemetry Transport               |
| NCNR             | Non-Cancellable Non-Returnable                    |
| NDK              | Native Development Kit (Android)                  |
| NVD              | National Vulnerability Database                   |
| OPC-UA           | Open Platform Communications Unified Architecture |
| OT               | Operational Technology                            |
| OTA              | Over-the-Air (atualização remota)                 |
| PERA / Purdue    | Purdue Enterprise Reference Architecture          |
| PoC              | Proof of Concept                                  |
| PREEMPT_RT       | Real-Time Preemption Patch para kernel Linux      |
| RTOS             | Real-Time Operating System                        |
| SBOM             | Software Bill of Materials                        |
| SAST             | Static Application Security Testing               |
| SCADA            | Supervisory Control and Data Acquisition          |
| SELinux          | Security-Enhanced Linux                           |
| SKU              | Stock Keeping Unit                                |
| SoC              | System on Chip                                    |
| SoM              | System on Module                                  |
| SPI              | Serial Peripheral Interface                       |

|         |   |
|---------|---|
| TCO     | Total Cost of Ownership                     |
| TFT     | Thin-Film Transistor                        |
| UART    | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| UI      | User Interface                              |
| USB OTG | USB On-The-Go                               |
| VLAN    | Virtual Local Area Network                  |
| VPN     | Virtual Private Network                     |

## Referências Técnicas

- IEC 62443-4-2: Security for Industrial Automation and Control Systems — Component Security Requirements
- EU Cyber Resilience Act (CRA) — Regulation (EU) 2024/2847
- Linux Kernel LTS Support Timeline — [kernel.org/category/releases.html](https://kernel.org/category/releases.html)
- Yocto Project Long-Term Support Releases — [yoctoproject.org](https://yoctoproject.org)
- PREEMPT\_RT Wiki — [wiki.linuxfoundation.org/realtime/start](https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/start)
- NXP Application Note AN13624: i.MX 8M Plus Dual-OS with Jailhouse Hypervisor
- NXP Application Note AN13172: Fast Boot for i.MX8 Platforms
- Toradex: Embedded Linux and Android Performance Benchmarks (2023) — [developer.toradex.com](https://developer.toradex.com)
- Toradex: Android or Linux for Embedded Systems (2016, referência de mercado) — [toradex.com/blog](https://toradex.com/blog)
- Torizon OS — EU Cyber Resilience Act (CRA) Compliance — [torizon.io/eu-cyber-resilience-act-cra](https://torizon.io/eu-cyber-resilience-act-cra)
- Civil Infrastructure Platform (CIP) — [cip-project.org](https://cip-project.org)
- Bosch Rexroth: ctrlX AUTOMATION Architecture Guide — [boschrexroth.com/ctrlx-automation](https://boschrexroth.com/ctrlx-automation)

- Advantech: Embedded Linux Industrial Display Solutions / IEC 62443-4-2 VOC Certification (2025)
- SOAFEE: 2022 Android Automotive Jitter Analysis — soafee.io
- MicroEJ: Is Android The Right Choice for Embedded Systems? (julho 2025) — microej.com
- Mender.io: Over-the-Air Update Framework for Embedded Linux
- SWUpdate: Software Update for Embedded Systems — sbabic.github.io/swupdate
- open62541: Open Source OPC UA Stack — github.com/open62541/open62541
- Linux Foundation — Embedded Linux Landscape Report 2024
- NVD — National Vulnerability Database: Android CVE History — nvd.nist.gov
- ISO 16750-3: Road Vehicles — Environmental Conditions — Mechanical Loads
- CISPR 25: Radio Disturbance Characteristics for Protection of Receivers in Vehicles
- IPC-7711/7721: Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies

*Copyright HTMG 2026. Versão 4.7 — Maio de 2026. Distribuição autorizada com indicação da fonte.*